2012—2019年黄河流域煤炭矿区对重要生态保护空间胁迫的时空格局分析

张玉韩[1]， 周 璞[2]， 赵 玉[3]

（1. 自然资源部信息中心，北京 100036；2. 中国自然资源经济研究院，北京 101149；
3. 中国电子信息产业发展研究院，北京 100048）

摘 要：黄河流域是中国重要的能源安全支撑区，也是保障国土生态安全的关键区域，煤炭资源开发与生态保护的协调发展对于统筹流域能源安全与生态安全具有重要现实意义。在识别黄河流域重要生态保护空间的基础上，提出空间胁迫指数概念，以矿区和50 m×50 m栅格为基础分析单元，解析黄河流域煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫现状及2012—2019年胁迫指数变化的时空格局，以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供决策参考。结果表明：(1) 煤炭矿区对黄河流域重要生态保护空间的胁迫程度总体较低，2019年空间胁迫指数仅为1.01%，但2012—2019年呈小幅上升趋势，面临胁迫的生态环境因子以土壤保持、防风固沙功能区和土壤侵蚀、沙漠化敏感区为主。(2) 煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫指数呈现较明显的空间分异特征，2019年胁迫程度较高的地区主要分布在黄土高原和鲁西地区，河南、秦岭一带、青海、宁夏南部以及内蒙古(除鄂尔多斯和乌海)胁迫程度总体较轻。(3) 流域整体空间胁迫指数的上升主要是由局部地区煤炭矿区与重要生态保护空间重叠面积的较快增加造成的，大部分地市胁迫程度下降，其中8个地市煤炭矿区全部退出了重要生态保护空间。

关 键 词：煤炭矿区；空间胁迫指数；重要生态保护空间；黄河流域
文章编号：

黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位[1]。黄河流域又被称为“能源流域”[2]，域内煤炭查明资源储量占到了全国的60%以上。同时，黄河流域也是中国重要的生态屏障，是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道。2019年9月，习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出“促进全流域高质量发展”的构想。环境协调性是流域高质量发展的重要组成部分[3]，表现为社会经济系统与生态环境系统的协同发展和演化[4]。黄河流域点多面广的煤炭矿山对生态环境造成了较大胁迫[5]，威胁到国家生态安全，煤炭资源开发与生态环境的协调发展，对于统筹能源资源安全与生态安全具有重要现实意义。

资源开发与生态环境的协调发展问题是区域可持续发展领域的重大科学命题之一[6]，学者们围绕特定区域，从资源赋存与开发利用入手，分析了煤炭资源开发对生态环境的影响及协调发展建议[7-12]。自黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略以来，资源环境、地质矿产领域内学者针对该地区产业发展与生态环境问题开展了大量研究，有侧重要素发展状态、问题以及产业发展对生态环境单要素影响分析的研究[13-16]，也有从全方位角度审视煤炭资源开发和能源重化工产业发展与生态环境关系的研究[17]。在揭示煤炭资源开发对生态环境的影响之后，相应治理措施成为学界关注的焦点，学者们多从环境管理、生态修复、技术改进等终端入手，来探讨矿区生态环境治理[18-19]。而随着国家

收稿日期：2021-07-07； **修订日期**：2021-10-16
基金项目：自然资源部部门预算项目“自然资源大数据应用与服务”(121101000000190008)资助
作者简介：张玉韩(1990-)，女，副研究员，博士，主要从事资源分析与政策研究. E-mail: zhangyuhanwinter@sina.com
通讯作者：周璞(1987-)，女，副研究员，博士，主要从事国土资源开发利用研究. E-mail: zhoupu1102@163.com

生态环境保护理念从末端治理向源头管控的转变，从空间角度优化煤炭开发利用成为更有效的管控手段[20]。总体来看，已有研究还缺乏基于空间胁迫视角对黄河流域煤炭资源开发与生态保护协调发展变化的分析，且学者们在具体评价过程中，研究对象和尺度多以市级行政区为主，未细化到矿区。

近年来，我国煤炭资源由于受到去产能、资源整合以及环境保护政策等影响，其开发活动在空间上已经发生了较大变化。据统计，2012年以来，黄河流域煤炭矿山数量减少幅度超过了40%。在这一背景下，煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫程度是否也随之发生了变化，变化方向与幅度如何，胁迫演进的空间格局又是怎样的？研究与回答这些问题，一方面有助于认识黄河流域近年来煤炭资源开发与生态环境的空间协调性变化情况，另一方面，能够为政府部门制定更精细的管理对策提供支撑。基于此，本研究拟以2012年和2019年黄河流域煤炭矿区数据为研究对象，构建空间胁迫指数，从空间胁迫视角研究7 a来黄河流域煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫变化及其空间格局，为黄河流域生态保护和高质量发展提供决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区以黄河干流流经的省区为主体，其范围以行政边界为标准确定，包括青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、山东以及内蒙古自治区（包括呼和浩特、包头、乌海、鄂尔多斯、巴彦淖尔、阿拉善盟）8个省级行政单元，89个市级行政单元[21]，总面积约为235×10^4 km²。煤炭资源在黄河流域8个省区中均有分布，其中山西、内蒙古、陕西、河南、山东等地区查明资源储量较大，合计共占全国的57%。从开发利用来看，2019年五省区煤炭矿山企业个数共2195个，占到了全国的42%，从业人数总和达143.5×10^4，占全国的62.5%①。2012年，煤炭采矿权分布在黄河流域71个市级行政单元，到2019年减少为64个，本研究在分析空间格局时以71个市级行政单元为研究区域。

1.2 数据来源

本研究所采用的数据主要包括煤炭矿区数据、生态系统服务功能重要性和生态系统敏感性数据、行政区划空间数据3种类型，以2012、2019年2个时点开展动态演化分析。数据主要来源如下：(1) 2019年煤炭矿区数据来源于自然资源部全国矿业权人勘查开采信息公示系统（http://kyqgs.mnr.gov.cn/），2012年煤炭矿区数据来源于自然资源部。(2) 黄河流域生态系统服务功能重要性和生态系统敏感性数据来源于中国生态系统评估与生态安全格局数据库（http://www.ecosystem.csdb.cn/），为2010年数据，原始栅格数据精度为1 km×1 km，考虑到本研究中最小煤炭矿区面积为4900 m²，在计算二者重叠面积时，为提高结果的精确度，将栅格大小转换为50 m×50 m，即最小煤炭矿区约相当于2个栅格像元。(3) 黄河流域省级、市级行政单元底图来源于国家标准地图服务网站（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/）下载的审图号为GS(2016)1606的底图。

1.3 研究方法

1.3.1 重要生态保护空间识别 从已有研究来看，生态系统服务功能重要性和生态系统敏感性是区域生态保护重要性评价的常用指标[22-26]，前者是指生态系统及其生态过程所形成与维持的人类赖以生存的自然环境条件和效用的重要程度[27]，后者是指一定区域发生生态问题的可能性和程度[28]。黄河流域煤炭资源开发对生态环境的典型影响包括地质地貌破坏、地表沉陷和崩塌等引发的土壤退化和沙化；“三废”排放、尾矿堆积、矿山废弃物中毒性、酸碱性等成分通过地面雨水渗透、径流等方式扩散，引发酸雨、土壤侵蚀和盐渍化；矿山突水和排水等引发矿区沙漠化和水土流失；勘探、采矿和矿石加工设施的建设剥离土壤植被，导致野生动植物生境改变[29-36]。针对这些影响，本研究选取生物多样性维持与保护、水源涵养、土壤保持、防风固沙为生态系统服务功能重要性单因子，选取酸雨、土壤侵蚀、盐渍化、沙漠化为生态系统敏感性单因子。

黄河流域重要生态保护空间由重要生态系统服务功能空间与生态系统敏感空间共同组成，计算公式为：

$$P = \mathrm{IEFS} \cup \mathrm{ESS} \tag{1}$$

式中：P为重要生态保护空间；IEFS为重要生态系统服务功能空间；ESS为生态系统敏感空间，二者参考《省级主体功能区划技术规程》，根据各单因子评价

① 来源于《2019全国非油气矿产资源开发利用统计年报》。

结果生成。根据中国生态功能区划数据库划分标准，生态系统服务功能重要性各单因子评价结果分为“极重要”、“重要”、“中等”和“一般”，筛选其中“极重要”和“重要”区域生成重要生物多样性维持与保护功能区、重要水源涵养功能区、重要土壤保持功能区和重要防风固沙功能区，重要生态系统服务功能空间计算公式为：

$$\text{IEFS}=[\text{重要生物多样性维持与保护功能区}]\cup[\text{重要水源涵养功能区}]\cup[\text{重要土壤保持功能区}]\cup[\text{重要防风固沙功能区}] \quad (2)$$

生态系统敏感性单因子评价结果分为“极敏感”、“高度敏感”、“中度敏感”、“轻度敏感”和“不敏感”，筛选其中“极敏感”和“高度敏感”区域生成酸雨敏感区、土壤侵蚀敏感区、盐渍化敏感区和沙漠化敏感区，生态系统敏感空间计算公式为：

$$\text{ESS}=[\text{酸雨敏感区}]\cup[\text{土壤侵蚀敏感区}]\cup[\text{盐渍化敏感区}]\cup[\text{沙漠化敏感区}] \quad (3)$$

1.3.2 煤炭矿区对重要生态保护空间胁迫程度评价

构建空间胁迫指数来测度煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫程度，将某一地区煤炭矿区范围与重要生态保护空间的重叠面积占该区域重要生态保护空间面积的比例定义为空间胁迫指数，计算公式如下：

$$C=\frac{S_o}{S_e}\times 100\% \quad (4)$$

式中：C为某一地区煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫指数，位于0~1之间，值越大说明该地区煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫程度越高，反之亦然，本研究中的煤炭矿区特指煤炭采矿权的空间范围；S_o为该地区煤炭矿区与重要生态保护空间的重叠面积；S_e为该地区重要生态保护空间总面积。S_o的具体计算方法为：在ArcGIS平台中，将煤炭矿区矢量图层转换为栅格图层，与重要生态保护空间图层进行叠加，采用Zonal工具进行统计。

2 结果与分析

2.1 黄河流域整体胁迫指数变化

煤炭矿区对黄河流域重要生态保护空间的胁迫程度总结较低，2019年空间胁迫指数仅为1.01%（表1），但2012—2019年呈小幅上升趋势，上升了0.13个百分点，二者重叠面积增加了2278 km²。从单因子来看，重要土壤保持功能区和土壤侵蚀敏感区受煤炭矿区胁迫程度最高，2019年空间胁迫指数分别为2.00%和1.99%；其次是重要防风固沙功能区和沙漠化敏感区，空间胁迫指数依次为1.91%和1.47%，而重要水源涵养功能区、重要生物多样性维持与保护功能区和盐渍化敏感区受胁迫程度较轻。从2012—2019年的变化情况来看，煤炭矿区新增或退出对重要水源涵养功能区、重要防风固沙功能区以及沙漠化敏感区的影响最大，煤炭矿区几乎全部退出了重要水源涵养功能区和重要生物多样性维持与保护功能区，酸雨敏感区受煤炭矿区的胁迫程度也呈小幅降低趋势，盐渍化敏感区受胁迫程度基本保持稳定，其他环境单因子面临的胁迫进一步上升。此外，分析表明，虽然煤炭矿区与重要防风固沙功能区重叠面积最大，但对其胁迫的程度却不是最高的，主要原因为黄河流域重要防风固沙功能区本底面积较大，冲淡了煤炭矿区对其产生的胁

表1 黄河流域煤炭矿区与重要生态保护空间的重叠面积及胁迫指数变化

Tab. 1 Overlapping between coal mine sites and key ecological protection areas and the changes of spatial stress index in the Yellow River Basin

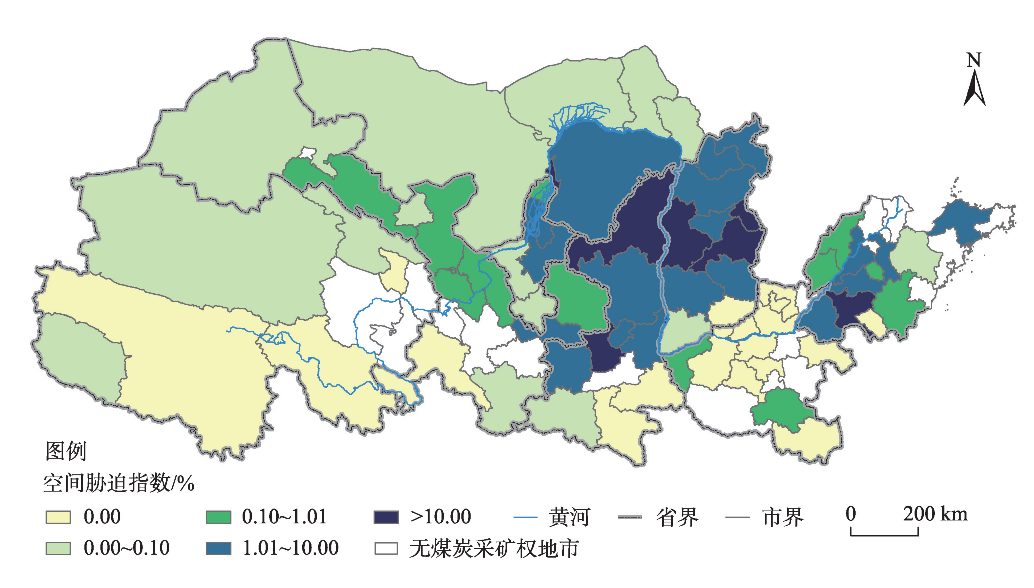
重要生态保护空间	2012年重叠面积/km²	2012年空间胁迫指数/%	2019年重叠面积/km²	2019年空间胁迫指数/%
重要生态保护空间	14730	0.88	17008	1.01
重要土壤保持功能区	4052	1.90	4272	2.00
重要水源涵养功能区	484	0.11	115	0.03
重要生物多样性维持与保护功能区	316	0.06	68	0.01
重要防风固沙功能区	10835	1.54	13443	1.91
沙漠化敏感区	6114	1.12	8073	1.47
盐渍化敏感区	584	0.18	566	0.18
土壤侵蚀敏感区	4027	1.88	4247	1.99
酸雨敏感区	372	0.55	303	0.45

迫效应。

2.2 胁迫指数变化空间格局

2.2.1 空间胁迫现状分布格局 煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫指数呈现较明显的空间分异特征，中下游地区总体高于上游地区。2019年胁迫程度较高的地市主要分布在黄土高原和鲁西地区(图1)，26个地市空间胁迫指数高于流域平均水平(1.01%)，山西有9个地市空间胁迫指数超过了2%，其中大同、朔州、太原、长治超过了5%，晋中和吕梁超过了10%，阳泉超过了20%；山东、陕西均有6个地市空间胁迫指数在1%以上，其中菏泽超过了5%，榆林超过了10%，咸阳、济宁超过了20%；此外，内蒙古鄂尔多斯和乌海空间胁迫指数也分别超过了5%和10%。河南、秦岭一带、青海、宁夏南部以及内蒙古(除鄂尔多斯和乌海)胁迫程度总体较轻，19个地市对重要生态保护空间的胁迫指数为0，其中11个在河南；甘肃酒泉等14个地市空间胁迫指数低于0.1%，其中4个在内蒙古。

从各地市煤炭矿区对生态系统服务功能重要性、生态系统敏感性单因子胁迫指数来看(图2)，鄂尔多斯平原和陕北地区煤炭矿区胁迫的环境单因子以重要土壤保持、防风固沙功能区以及沙漠化、



注：该图基于国家标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1606的底图制作，底图边界无修改。下同。

图1　2019年黄河流域煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫指数

Fig. 1　Spatial stress index of coal mining sites on key ecological protection areas in the Yellow River Basin in 2019

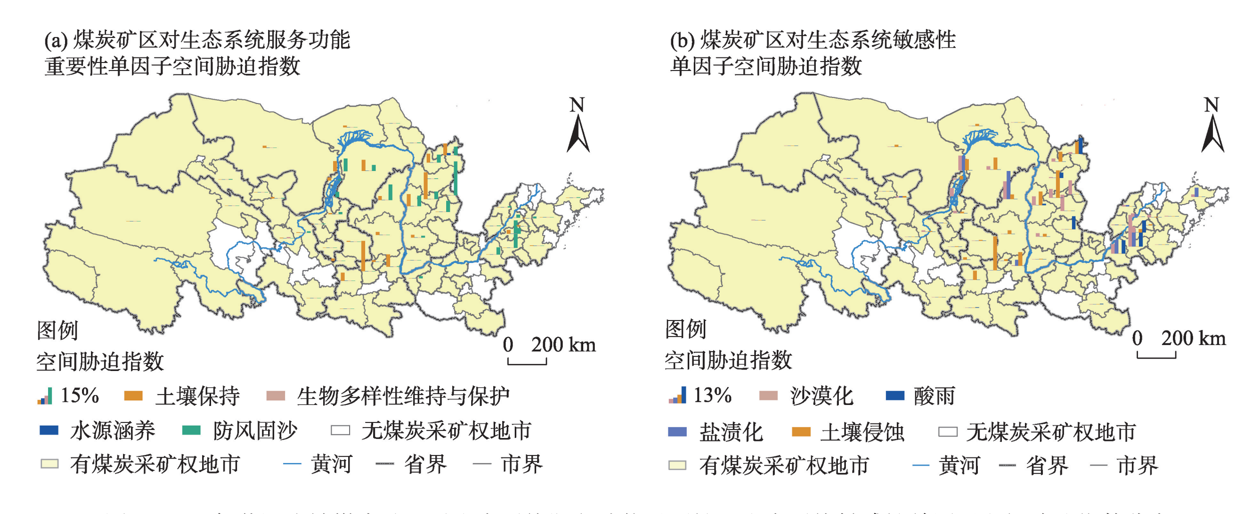


图2　2019年黄河流域煤炭矿区对生态系统服务功能重要性和生态系统敏感性单因子空间胁迫指数分布

Fig. 2　Spatial stress index of coal mining sites on single factors of ecosystem service function importance and ecological sensitivity in the Yellow River Basin in 2019

盐渍化、土壤侵蚀敏感区为主，如陕西榆林煤炭矿区对盐渍化敏感区的胁迫指数达22.1%；陕西中部地区以重要土壤保持功能区和土壤侵蚀敏感区为主，如陕西咸阳煤炭矿区对重要土壤保持功能区、土壤侵蚀敏感区胁迫指数分别达27.3%和26.7%；晋北、晋中地区主要胁迫的环境因子为重要土壤保持、防风固沙功能区以及土壤侵蚀、沙漠化、酸雨敏感区，如山西阳泉煤炭矿区对重要防风固沙功能区胁迫指数达30.3%；鲁西地区主要胁迫的环境因子为重要防风固沙功能区以及沙漠化、盐渍化、酸雨敏感区，其中济宁煤炭矿区对重要防风固沙功能区和沙漠化敏感区的胁迫指数分别达24.4%和25.2%。

2.2.2 空间胁迫变化趋势 从空间胁迫指数的变化趋势来看(图3、表2)，大部分地市(43个)胁迫程度下降，主要分布在青南、甘肃、蒙西、山西、豫西、豫南、山东以及秦岭一带，其中降低最明显的是山西太原和陕西铜川，降低幅度超过了5%；其次为山西阳泉和山东淄博，降低幅度超过了3%。从煤炭矿区与重要生态保护空间的重叠面积来看，陕西安康、山西太原和山东淄博退出面积超过了100 km^2，山西大同、忻州、临汾，山东济南、济宁以及陕西铜川、甘肃张掖退出面积超过了50 km^2，河南洛阳、信阳，陕西安康、商洛，甘肃甘南以及青海西宁、玉树、果洛等地市煤炭矿区全部退出了重要生态保护空间。

相比之下，胁迫指数升高的地市仅13个，其中陕西咸阳和榆林升高较为明显，尤其是咸阳，增加了近20%。但从煤炭矿区与重要生态保护空间的重叠面积来看，则是陕西榆林增加最多，超过了2000 km^2，其次为鄂尔多斯，增加了约814 km^2，陕西咸阳重叠面积增加了近200 km^2。综合上述分析可以看出，黄河流域整体空间胁迫指数的上升主要是由局部地区如榆林、鄂尔多斯、咸阳等地市煤炭矿区与重要生态保护空间重叠面积的较快增加造成的。

综合前文测算结果，并对比各地市煤炭矿区与重要生态保护空间重叠面积以及矿区总面积的变化情况，可以判断出不同地市在煤炭矿区退出时是否优先考虑了重要生态保护空间，以及在新增时是否重点考虑了对重要生态保护空间的避让，判断结果如表3所示。胁迫指数降低的地市中，有33个地市在煤炭矿区退出时优先考虑了重要生态保护空间，10个未优先考虑重要生态保护空间；胁迫指数不变的地市中，山西长治和晋城在煤炭矿区增加时考虑了对重要生态保护空间的避让，而山东临沂和宁夏固原在煤炭矿区退出时未优先考虑重要生态保护空间；胁迫指数升高的地市中，山东菏泽和陕西延安、咸阳、宝鸡在煤炭矿区增加时优先考虑了对重要生态保护空间的避让，而7个地市未优先考虑对重要生态保护空间的避让。总体上看，更多地市在煤炭矿区退出或增加时考虑了本地区内重要生态保护空间。

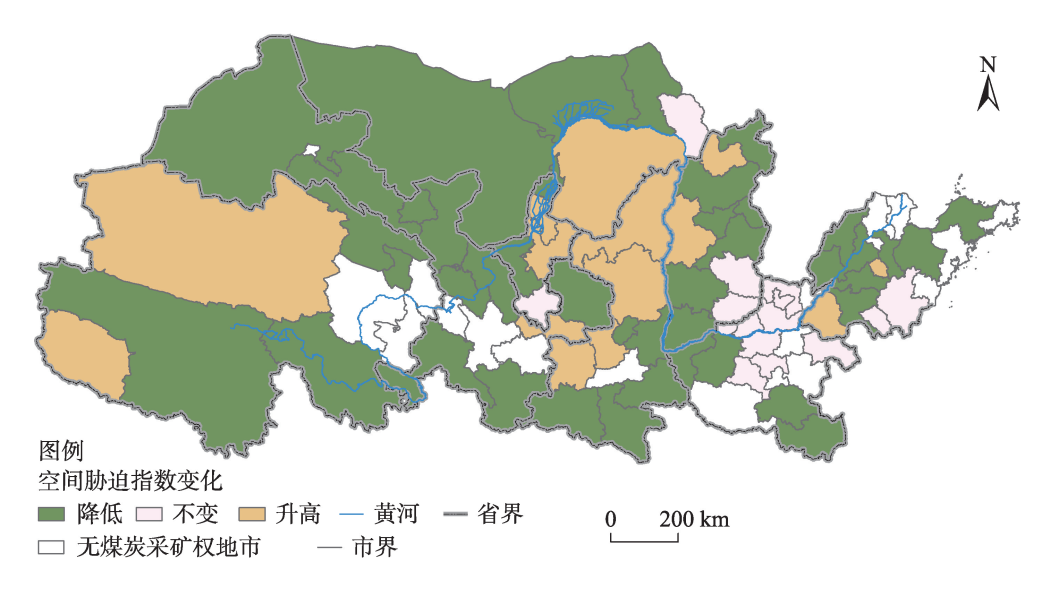


图3 2012—2019年黄河流域煤炭矿区对重要生态保护空间胁迫指数变化空间分布

Fig. 3 Distribution of spatial stress index changes of coal mining sites on key ecological protection areas in the Yellow River Basin from 2012 to 2019

表2 黄河流域各地市煤炭矿区与重要生态保护空间的重叠面积及胁迫指数变化

Tab. 2 Change of overlapping between coal mining sites and key ecological protection areas and spatial stress index in the cities of Yellow River Basin

地市	2019年重叠面积/km²	2012—2019年重叠面积变化/km²	2012—2019年胁迫指数变化/%	地市	2019年重叠面积/km²	2012—2019年重叠面积变化/km²	2012—2019年胁迫指数变化/%
铜川	12.4	−68.0	−6.7270	聊城	11.9	−0.5	−0.0062
太原	205.3	−118.3	−5.2698	甘南	0.0	−1.2	−0.0044
阳泉	145.3	−22.1	−3.6483	运城	2.1	−0.1	−0.0013
淄博	43.7	−106.0	−3.0842	德州	96.9	−0.1	−0.0007
济宁	1011.8	−85.5	−1.8067	果洛	0.0	−0.3	−0.0004
济南	124.5	−82.6	−1.4097	驻马店	27.7	−0.1	−0.0002
渭南	131.5	−28.6	−1.0630	玉树	0.0	−0.3	−0.0001
石嘴山	41.0	−42.0	−1.0326	固原	3.7	0.0	0.0000
安康	0.0	−219.2	−0.9783	临沂	4.1	0.0	0.0000
乌海	192.7	−15.9	−0.9401	长治	33.1	0.0	0.0000
泰安	164.3	−35.2	−0.9391	安阳	0.0	0.0	0.0000
大同	764.8	−98.2	−0.8417	鹤壁	0.0	0.0	0.0000
临汾	160.7	−54.0	−0.7273	焦作	0.0	0.0	0.0000
晋中	187.2	−8.7	−0.6109	晋城	0.0	0.0	0.0000
忻州	372.5	−59.8	−0.3722	平顶山	0.0	0.0	0.0000
白银	33.0	−27.4	−0.3203	商丘	0.0	0.0	0.0000
烟台	44.7	−11.2	−0.3035	新乡	0.0	0.0	0.0000
金昌	0.1	−17.3	−0.2539	许昌	0.0	0.0	0.0000
张掖	52.8	−95.5	−0.2539	枣庄	0.0	0.0	0.0000
兰州	15.2	−16.9	−0.2285	郑州	0.0	0.0	0.0000
三门峡	11.9	−3.8	−0.2156	济源	0.0	0.0	0.0000
洛阳	0.0	−1.9	−0.2114	呼和浩特	9.4	0.0	0.0000
汉中	23.8	−47.2	−0.1845	海西	75.2	54.1	0.0197
中卫	2.8	−10.9	−0.1502	莱芜	4.1	0.6	0.1353
潍坊	3.1	−9.6	−0.1142	延安	619.0	35.0	0.1475
武威	87.7	−27.1	−0.0861	平凉	121.9	16.4	0.2382
陇南	1.3	−18.5	−0.0735	朔州	706.2	62.2	0.5943
包头	8.1	−12.8	−0.0508	吴忠	216.4	103.1	0.7220
海北	31.0	−14.3	−0.0418	吕梁	997.7	78.8	0.7986
西宁	0.0	−0.6	−0.0295	银川	364.7	64.7	0.8629
商洛	0.0	−4.3	−0.0232	宝鸡	122.0	87.3	0.9278
酒泉	5.4	−19.8	−0.0198	鄂尔多斯	4318.9	813.7	0.9519
庆阳	108.2	−3.0	−0.0165	菏泽	159.0	22.9	1.2762
巴彦淖尔	26.7	−8.5	−0.0156	榆林	4779.5	2165.5	5.2897
阿拉善	51.7	−25.9	−0.0129	咸阳	269.0	196.9	19.5448
信阳	0.0	−0.8	−0.0107				

3 结 论

本研究以矿区和50 m×50 m栅格为基础分析单元，测算了2019年黄河流域煤炭矿区对重要生态保护空间和生态系统服务功能重要性、生态系统敏感性单因子的空间胁迫现状及其分布格局，分析了2012—2019年黄河流域整体及各地市煤炭矿区与重要生态保护空间协调演进趋势，主要研究结论如下：

（1）煤炭矿区对黄河流域重要生态保护空间的胁迫程度总体较低但空间分异特征明显。2019年

表3 黄河流域各地市在煤炭矿区退出或增加时对重要生态保护空间的考虑类型

Tab. 3 Whether the key ecological protection areas were considered by the cities in the Yellow River Basin when coal mining sites withdraw or increase

胁迫指数变化	类型	地市
胁迫指数降低	煤炭矿区退出优先考虑了重要生态保护空间	山西太原、阳泉、大同，内蒙古乌海、巴彦淖尔、阿拉善盟，山东济南、淄博、泰安、聊城、德州，河南洛阳、信阳，陕西铜川、渭南、安康、汉中、商洛，宁夏石嘴山、中卫，甘肃兰州、白银、金昌、张掖、酒泉、庆阳、甘南、武威、陇南，青海西宁、海北、果洛、玉树
	煤炭矿区退出未优先考虑重要生态保护空间	山西临汾、晋中、忻州、运城，内蒙古包头，山东济宁、烟台、潍坊，河南三门峡、驻马店
胁迫指数不变	煤炭矿区增加考虑了对重要生态保护空间的避让	山西长治、晋城
	煤炭矿区退出未考虑重要生态保护空间	山东临沂，宁夏固原
胁迫指数升高	煤炭矿区增加优先考虑了对重要生态保护空间的避让	山东菏泽，陕西延安、咸阳、宝鸡
	煤炭矿区增加未优先考虑对重要生态保护空间的避让	山西朔州，内蒙古鄂尔多斯，山东莱芜，陕西榆林，甘肃平凉，青海海西，宁夏银川

流域整体空间胁迫指数仅为1.01%，但2012—2019年呈小幅上升趋势。胁迫程度较高的地区主要分布在黄土高原和鲁西地区，河南、蒙西北、蒙中、秦岭一带、青海以及宁夏南部胁迫程度总体较轻，19个地市煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫指数为零。

（2）分类型来看，重要土壤保持功能区和土壤侵蚀敏感区受煤炭矿区胁迫程度最高，其次为重要防风固沙功能区和沙漠化敏感区，且2012—2019年面临的胁迫呈进一步增强态势；重要水源涵养、生物多样性维持与保护功能区以及盐渍化敏感区受胁迫程度较轻，2019年煤炭矿区几乎全部退出了重要水源涵养和生物多样性维持与保护功能区。

（3）流域整体空间胁迫指数的上升主要是由局部地区煤炭矿区与重点生态保护空间重叠面积的较快增加造成的，大部分地市胁迫程度下降，主要分布在青南、甘肃、蒙西、山西、豫西、豫南、山东以及秦岭一带，河南洛阳8个地市煤炭矿区全部退出了重要生态保护空间。总体上看，更多地市在煤炭矿区退出或增加时考虑了本地区内的重要生态保护空间。

本研究主要从重叠面积角度分析了煤炭矿区对重要生态保护空间的胁迫程度，但煤炭资源开发对地区生态环境的影响还受到开采量、开采阶段、工艺流程、复垦方式等多种因素的影响，由于受数据可获性限制，本研究尚未考虑上述因素。此外，煤炭资源开发对地区生态环境的影响并非都是负面的，相反，一些地区煤炭资源开发在一定程度上改善了当地生态环境，需要进一步结合影像数据进行分析。下一步将针对上述问题继续深化研究，为黄河流域煤炭资源开发与生态环境协调发展提供更加科学的决策支撑。

参考文献（References）

[1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, 2019(20): 1-3. [Xi Jinping. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. China Water Resources, 2019(20): 1-3.]

[2] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 409-423. [Yang Yongchun, Mu Yanjie, Zhang Wei. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 409-423.]

[3] 赵剑波, 史丹, 邓洲. 高质量发展的内涵研究[J]. 经济与管理研究, 2019, 40(11): 15-31. [Zhao Jianbo, Shi Dan, Deng Zhou. A framework of China's high-quality economic development[J]. Research on Economics and Management, 2019, 40(11): 15-31.]

[4] 史丹. 绿色发展与全球工业化的新阶段: 中国的进展与比较[J]. 中国工业经济, 2018(10): 5-18. [Shi Dan. The green development and the new stage of industrialization: Progress in China and comparison with other[J]. China Industrial Economics, 2018(10): 5-18.]

[5] 金凤君, 马丽, 许堞. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 127-136. [Jin Fengjun, Ma Li, Xu Die. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 127-136.]

[6] 樊杰, 周侃, 孙威, 等. 人文-经济地理学在生态文明建设中的学科价值与学术创新[J]. 地理科学进展, 2013, 32(2): 147-160.

[Fan Jie, Zhou Kan, Sun Wei, et al. Scientific values and research innovations of human-economic geography in construction of ecological civilization[J]. Progress in Geography, 2013, 32(2): 147-160.]
[7] 沈镭, 高丽. 中国西部能源及矿业开发与环境保护协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 17-23. [Shen Lei, Gao Li. Managing energy and mineral resources development and pollution control coordinately in the western China[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(10): 17-23.]
[8] 周海魂, 黄新兰. 新疆煤炭资源开发与生态环境保护[J]. 中国煤炭, 2011, 37(6): 16-19. [Zhou Haihun, Huang Xinlan. Coal resources development and ecological environment protection in Xinjiang [J]. China Coal, 2011, 37(6): 16-19.]
[9] 王旭, 周爱国, 甘义群, 等. 青藏高原矿产资源开发与地质环境保护协调发展的对策探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 69-73. [Wang Xu, Zhou Aiguo, Gan Yiqun, et al. Study on the harmonize development of mineral resources exploration and the geoenvironment protection countermeasures in Qinghai-Tibet[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(2): 69-73.]
[10] 吴亚男, 李元实. 煤炭开发布局西移对生态环境的影响及对策建议[J]. 环境影响评价, 2017, 39(4): 10-12. [Wu Ya'nan, Li Yuanshi. Ecological environmental impact and its solutions to transfer of coal development to western regions[J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(4): 10-12.]
[11] 赵玉婷, 邹广迅, 董林艳, 等. 西北煤炭开发生态风险管控区划分及管理策略[J]. 环境科学研究, 2019, 32(3): 372-379. [Zhao Yuting, Zou Guangxun, Dong Linyan, et al. Division and management strategy of regional ecological risk control zonation for coal exploitation and utilization in northwest China[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(3): 372-379.]
[12] 潘换换, 吴树荣, 杨琪雪, 等. 山西煤田生态系统服务热(冷)点时空格局[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1686-1695. [Pan Huanhuan, Wu Shurong, Yang Qixue, et al. Spatiotemporal pattern of hotspots (coldspots) of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1686-1695.]
[13] 时进钢, 王亚男, 陈晓丽. 黄河中上游能源化工区大气污染跨界环境影响分析[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(6): 21-25. [Shi Jingang, Wang Ya'nan, Chen Xiaoli. Crossing boundary impact analysis of air pollutant in energy and chemical industry region of upper and middle reaches of the Yellow River[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23 (6): 21-25.]
[14] 郭家新, 胡振琪, 袁冬竹, 等. 黄河流域下游煤矿采煤塌陷区耕地破碎化动态演变——以山东济宁市为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3039-3055. [Guo Jiaxin, Hu Zhenqi, Yuan Dongzhu, et al. Dynamic evolution of cultivated land fragmentation in coal mining subsidence area of the lower Yellow River Basin: A case study of Jining City, Shandong Province[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 3039-3055.]
[15] 闫敬旺, 王树斌, 刘朝军. 黄河流域煤炭产业发展和生态环境保护的耦合关系研究[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(6): 27-34. [Yan Jingwang, Wang Shubin, Liu Chaojun. Research on the coupling relationship between coal industry development and ecological environment protection in the Yellow River Basin[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(6): 27-34.]
[16] 奥勇, 蒋岭峰, 白召弟, 等. 基于格网GIS的黄河流域土地生态质量综合评价[J/OL]. 干旱区地理: 1-16. [2021-10-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210812.1543.006.html. [Ao Yong, Jiang Lingfeng, Bai Zhaodi, et al. Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on Grid-GIS[J/OL]. Arid Land Geography: 1-16. [2021-10-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210812.1543.006.html.]
[17] 时光, 任慧君, 乔立瑾, 等. 黄河流域煤炭高质量发展研究[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(8): 36-44. [Shi Guang, Ren Huijun, Qiao Lijin, et al. Research on high-quality development of coal in the Yellow River Basin[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(8): 36-44.]
[18] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221. [Peng Suping, Bi Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.]
[19] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1378-1391. [Bian Zhengfu, Yu Haochen, Lei Shaogang, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1378-1391.]
[20] 马丽, 田华征, 康蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 137-149. [Ma Li, Tian Huazheng, Kang Lei. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 137-149.]
[21] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 460-473. [Zhang Baifa, Miao Changhong. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460-473.]
[22] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12. [Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 9-12.]
[23] 颜磊, 许学工, 谢正磊, 等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3117-3125. [Yan Lei, Xu Xuegong, Xie Zhenglei, et al. Integrated assessment on ecological sensitivity for Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3117-3125.]

[24] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 中国生态环境敏感区评价[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1607−1616. [Liu Junhui, Gao Jixi, Ma Su, et al. Evaluation of ecological sensitivity in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(10): 1607−1616.]

[25] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571−576. [Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 571−576.]

[26] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635−640. [Ouyang Zhiyun, Wang Rusong, Zhao Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635−640.]

[27] Daily G C. Natures services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C: Island Press, 1997.

[28] Liang C, Li X. The ecological sensitivity evaluation in Yellow River Delta National Natural Reserve[J]. Clean Soil Air Water, 2012, 40(10): 1197−1207.

[29] 崔彬, 牛建英, 李超峰, 等. 现代矿产资源经济学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015. [Cui Bin, Niu Jianying, Li Chaofeng, et al. Modern mineral resource economics[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.]

[30] 吴喜军, 李怀恩, 董颖. 煤炭开采对水资源影响的定量识别——以陕北窟野河流域为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 246−253. [Wu Xijun, Li Huai'en, Dong Ying. Quantitative recognition of coal mining on water resources influence: A case of Kuye River in northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 246−253.]

[31] 陈介福, 东野光亮, 张志国. 试论煤炭资源开发对生态环境的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 1989, 1(1): 68−72. [Chen Jiefu, Dongye Guangliang, Zhang Zhiguo. Discussion on the coal resource exploitation and the effect to ecological environment[J]. China Population, Resources and Environment, 1989, 1(1): 68−72.]

[32] 吴晓华, 潘卫东. 我国煤炭资源开发生态环境影响调查[J]. 中国科技论文, 2014, 9(5): 600−604. [Wu Xiaohua, Pan Weidong. Investigation of effect of coal resources exploitation on ecological environment in China[J]. China Science Paper, 2014, 9(5): 600−604.]

[33] 毛国力, 程宏光, 张璐璐, 等. 煤炭资源开发对生态环境的影响与对策分析[J]. 煤炭与化工, 2013, 36(12): 141−142, 145. [Mao Guoli, Cheng Hongguang, Zhang Lulu, et al. Coal resources development influencing ecological environment and the countermeasure analysis[J]. Coal and Chemical Industry, 2013, 36(12): 141−142, 145.]

[34] 贾宗谦, 吕向前, 胡思虎, 等. 甘肃省煤炭资源开发对生态环境影响的探讨[J]. 能源环境保护, 2020, 34(5): 104−108. [Jia Zongqian, Lü Xiangqian, Hu Sihu, et al. Discussion on the influence of coal resource development on ecological environment in Gansu Province[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(5): 104−108.]

[35] 黄翌, 汪云甲, 田丰, 等. 煤炭开采对植被−土壤系统扰动的碳效应研究[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 817−823. [Huang Yi, Wang Yunjia, Tian Feng, et al. Carbon disturbance effects in the vegetation-soil system caused by coal mining[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 817−823.]

[36] 武强, 刘伏昌, 李铎. 矿山环境研究理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2005. [Wu Qiang, Liu Fuchang, Li Duo. Theoretical and practical research on mine environment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.]

Temporal and spatial pattern of coal mining sites' stress on key ecological protection areas in the Yellow River Basin from 2012 to 2019

ZHANG Yuhan[1], ZHOU Pu[2], ZHAO Yu[3]

(1. Information Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100036; 2. Chinese Academy of Natural Resources Economics, Beijing 101149, China; 3. China Center for Information Industry Development, Beijing 100048, China)

Abstract: The Yellow River Basin is an important region for the energy supply of China and key for national ecological security. Coordination of coal resource development and ecological protection is essential to ensure energy and ecological security. Scholars in the fields of resources, environment, geology, and minerals have conducted several studies on the development of the coal industry and ecological environment in the Yellow River Basin. However, there is a lack of analysis on the coordinated development and change in coal resource development and ecological protection from the spatial stress perspective. Based on the key ecological protection area identification in the Yellow River Basin, the concept of spatial stress index was introduced. The mining sites and 50 m×50 m grid were taken as the basic unit of stress status analysis for the coal mine sites inside the key ecological protection areas in the Yellow River Basin. The space-time pattern of stress index development from 2012 to 2019 was analyzed. The results are as follows. (1) The stress degree of coal mining sites on the important ecological protection space of the Yellow River Basin is low, but the spatial differentiation characteristics are obvious. In 2019, the overall spatial stress index of the basin was only 1.01%, but it showed a slight upward trend from 2012 to 2019. The areas with a high-stress degree are mainly distributed in the Loess Plateau and western Shandong. However, the stress index in Henan, Qinling area, Qinghai, southern Ningxia, and Inner Mongolia (except Ordos and Wuhai) is relatively low. (2) The major ecological environment factors under stress include soil conservation, wind prevention, sand fixation function areas, soil erosion, and desertification sensitive areas. The stress degree of important soil conservation functional and soil erosion sensitive areas is the highest, followed by important wind prevention, sand fixation functional areas, and desertification sensitive areas. The stress from 2012 to 2019 is further enhanced. Important water conservation, biodiversity maintenance, protection functional areas, and salinization sensitive areas are less stressed. Almost all coal mining sites withdrew from important water conservation and biodiversity maintenance and protection functional areas in 2019. (3) The overall stress index rise across the Yellow River Basin is mainly caused by the rapid increase in overlapping between coal mine sites and key ecological protection areas. In most cities, the stress index drops, mainly distributed in southern Qinghai, Gansu, western Inner Mongolia, Shanxi, western Henan, southern Henan, Shandong, and Qinling areas. Coal mining is completely withdrawn from the key ecological protection areas in eight cities. More cities have considered the important ecological protection space in the region when withdrawing or increasing coal mining sites.

Key words: coal mining sites; spatial stress index; key ecological protection area; Yellow River Basin